

УДК 614.841

DOI: <https://doi.org/10.31731/2524.2636.2023.7.1.33.44>

Назарій КОЗЯР, кандидат технічних наук (ORCID: 0000-0001-9082-0771),
Національний університет цивільного захисту України

ВИЗНАЧЕННЯ КРИТИЧНИХ ЗНАЧЕНЬ ПАРАМЕТРІВ ЗОВНІШНІХ ТЕРМОУДАРНИХ ВПЛИВІВ НАДЗВУКОВОГО ПОТОКУ ПОВІТРЯ НА ПОВЕРХНЮ ЦИЛІНДРИЧНИХ МЕТАЛЕВИХ ОБОЛОНОК ЗАРЯДІВ ПІРОТЕХНІЧНИХ НІТРАТНО-МЕТАЛЕВИХ СУМІШЕЙ В УМОВАХ ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ

Розроблено математичні моделі зовнішніх термоударних впливів надзвучового потоку повітря на металеві оболонки зарядів нітратно-металізованих сумішей з добавками органічних та неорганічних речовин, що враховують циліндричну форму оболонки; технологічні параметри сумішей та їх термомеханічні властивості; температурні залежності теплофізичних властивостей суміші та оболонки; розподіл зовнішнього теплового потоку вздовж поверхні оболонки в залежності від режиму обтікання (ламінарного, турбулентного). Визначено критичні значення параметрів зовнішніх термоударних впливів, перевищення яких призводить до передчасного займання зарядів сумішей, вибухового розвитку їх горіння під оболонками та, у кінцевому підсумку, до пожежонебезпечного руйнування піротехнічних виробів.

Ключові слова: піротехнічні вироби, пожежна безпека, газодинамічні процеси, методи теорії теплопровідності, піротехнічні нітратно-металізовані суміші.

Постановка проблеми. Багато піротехнічних виробів (освітлювальні вироби, піротехнічні ГЧ-випромінювачі та ін.) на основі ущільнених сумішей з порошків металевих паливних, нітратовмісних окиснювачів та добавок органічних та неорганічних речовин в умовах їх застосування піддаються інтенсивним термоударним впливам при надзвучовому обдутті потоком повітря. В результаті відбувається суттєвий нагрів зарядів реакційноздатних до підвищених температур сумішей, що приводить до їх передчасних локальних займань та подальшого прискорення процесу горіння сумішей під металевими оболонками в умовах зростаючих температур та зовнішніх тисків. Це приводить до їх вибухонебезпечних руйнувань з утворенням різних чинників пожежі (полум'я або високотемпературний потік продуктів згорання, розігріті частини зарядів сумішей, іскри тощо).

Тому на стадії проектування та розробки вказаних виробів необхідно вміти розраховувати критичні значення параметрів зовнішніх термоударних впливів (швидкостей надзвучового обдуву потоком повітря, часів їх дії) на металеві оболонки зарядів сумішей різної геометричної форми, контроль перевищення яких дозволяє попереджати передчасні спрацьовування виробів з подальшими їх пожежонебезпечними руйнуваннями.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На даний час проведено аналіз та розглянуто стандартні піротехнічні вироби різноманітного призначення. Піротехнічні вироби мають у своєму складі: суміші з порошків металевих паливних (Mg, Al, Ti, Zr та ін.), нітратовмісні окиснювачі (NaNO₃, Sr(NO₃)₂, Ba(NO₃)₂, KNO₃ та ін.) та добавки органічних речовин (парафіну, стеарину, нафталіну, антрацену, уротропіну, метальдегіду, каніфолі, ідитолу та ін.) та неорганічних речовин (LiF, NaF, BaF₂, SiF₂, SrF₂, AlF₃ та ін.) [1-12].

Піротехнічні вироби застосовуються в умовах надзвучового обдуву потоком повітря, в результаті чого відбувається термоударний вплив, який розглянуто в роботах

[10,13]. Це призводить до значного нагрівання зарядів піротехнічних виробів і, відповідно, до прискорення процесу горіння піротехнічних сумішей під металевими оболонками виробів, що в подальшому призводить до руйнування виробів під час застосування, що розглянуто в роботах [11-17].

Слід зазначити, що важливим є вмiти попереджати передчасні спрацьовування піротехнічних виробів за рахунок проведення розрахунків критичних значень параметрів зовнішніх термоударних впливів (швидкостей надзвукового обдуву потоком повітря, часів їх дії) на металеві оболонки зарядів сумішей різної геометричної форми на стадії проектування та розробки виробів.

Нині вказана задача для розглядуваних піротехнічних нітратно-металізованих сумішей з добавками органічних та неорганічних речовин ще не вирішена.

Постановка задачі та її розв'язання. Тому метою даної роботи є розробка математичних моделей термоударних впливів надзвукового потоку повітря на металеві оболонки циліндричної форми зарядів ущільнених сумішей з порошків Mg, Al, NaNO₃ та добавок різних речовин (парафіну, стеарину, нафталіну, антрацену, уротропіну, метальдегіду, каніфолі, ідитолу, фторидів металів (LiF, NaF, BaF₂, SiF₂, SrF₂, AlF₃)) для визначення критичних значень параметрів, як основи для попередження передчасних пожежонебезпечних руйнувань піротехнічних виробів.

Виклад основного матеріалу дослідження. Основою освітлювальних виробів є освітлювальний елемент (факел, зірка тощо), що є металевим стаканом, куди запресовуються заряди виробів на основі піротехнічних нітратно-металевих сумішей, що розглядаються, та основні заряди спеціальних багатокомпонентних піротехнічних сумішей.

Піротехнічні вироби при їх застосуванні (умови пострілу та польоту (запуск з нерухомих наземних установок або з літальних апаратів)) можуть піддаватися інтенсивному нагріву поверхні виробів надзвуковим повітряним потоком (табл. 1).

Таблиця 1. Значення температури виробів (T_w , К) залежно від швидкості обдуву повітряним потоком (V , м/с) та режиму обтікання (за даними продувок тіл різної геометричної форми в аеродинамічних трубах [1,2])

$V, 10^2 \text{ м/с}$	$T_w, \text{ К}$	
	Ламінарний режим	Турбулентний режим
5	540	620
6,5	730	840
10	820	950
14	1040	1170
17	1320	1480
20	1650	1850

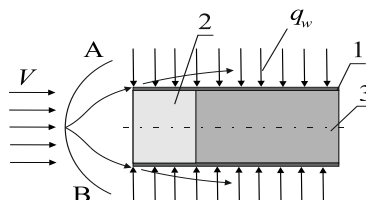


Рисунок 1. Схема нагріву освітлювального виробу (умови пострілу та польоту): 1 – циліндрична металева оболонка; 2 – заряд виробу; 3 – основний заряд багатокомпонентної піротехнічної суміші; V – швидкість надзвукового потоку повітря; АВ – фронт ударної хвилі; q_w – тепловий потік, що поступає на поверхню корпусу виробу з приграничного шару при гальмуванні газів

При перевищенні критичних значень параметрів зовнішніх термоударних впливів (швидкості обдуву потоком повітря, часу його дії) відбувається істотний нагрів найбільш реакційноздатних до підвищених температур зарядів виробів (рис. 1), що призводить до їх передчасних локальних спалахувань під герметичними корпусами виробів та подальшого розвитку процесу горіння в умовах зростаючих підвищених температур нагріву та зовнішніх тисків, що призводить, у кінцевому підсумку, до пожежонебезпечних руйнувань виробів.

Одним з критеріїв, що оцінює аеродинамічне нагрівання й прогнозує зони найбільш сильного термовпливу на поверхні оболонки, можна розглядати розподіл температури на його поверхні при нульових кутах атаки й ковзання, тобто при поздовжньому обтіканні потоком повітря із заданими швидкостями й висотами польоту, режимами обтікання й ін. [1,2]. При нульових кутах атаки й ковзання, які можна реалізувати на практиці відповідними програмами польоту виробів, їхнє нагрівання піддається розрахунку як для ламінарного, так і для турбулентного режимів обтікання виробу газовими потоками.

Крім цього, для досліджуваних розмірів оболонки при надзвуковому обдуві зі швидкостями V ($V > 7 \cdot 10^2 \dots 10^3$ м/с) реалізується по всій її довжині, в основному, турбулентний режим обтікання, тому що значення критерію Рейнольдса в цьому випадку $Re > 10^5$ (критерій Рейнольдса $Re = \frac{2 \cdot V \cdot R_3}{\nu}$, де R_3 – зовнішній радіус оболонки; ν – коефіцієнт кінематичної в'язкості потоку повітря). Ламінарний режим реалізується тільки у окремих випадках (при невеликих радіусах оболонки й помірних швидкостях обдуву), коли $Re < 10^5$.

Для визначення на поверхні оболонки вказаних небезпечних зон знайдено розподіл теплового потоку з приграничного шару уздовж її поверхні в залежності від режиму обтікання.

При розгляді задачі нагріву оболонки зовнішнім надзвуковим потоком повітря, враховується, що на її поверхню з приграничного шару надходить тепловий потік q_n . Передбачається, що $\frac{\partial T}{\partial r} \neq 0$, $\frac{\partial T}{\partial \varphi} = \frac{\partial T}{\partial z} = 0$ (r , φ , z – циліндричні координати), а також розглядається область у напрямку x , де $q_n = (q_n)_{max}$, тобто оцінюється зміна температури у зонах максимальних зовнішніх термодій, що відповідає за передчасне займання зарядів сумішей та пожежонебезпечне руйнування виробів.

Таким чином, в області максимальних термонавантажень поверхні оболонки розглядається задача нагріву двошарового середовища, що складається з двох шарів різнорідних матеріалів: один – з матеріалу оболонки, а другий – з матеріалу заряду суміші. Між шарами спостерігається ідеальний тепловий контакт, радіаційні та конвективні тепловтрати, у першому наближенні, не враховуються, а додаються умови (у відповідності з використовуваними у піротехнічному виробництві значеннями R_3 - $R_6 = 8 \cdot 10^{-4} \dots 3 \cdot 10^{-3}$ м та $R_6 = 2 \dots 4 \cdot 10^{-2}$ м [1,2]).

Рівняння математичної моделі нагрівання оболонки для розглядуваного випадку мають вигляд:

$$C_{V1}(T_1) \cdot \frac{\partial T_1}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda_1(T_1) \cdot \frac{\partial T_1}{\partial r} \right), 0 < r < R_6, t > 0, \quad (1)$$

$$C_{V2}(T_2) \cdot \frac{\partial T_2}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda_2(T_2) \cdot \frac{\partial T_2}{\partial r} \right), R_6 < r < +\infty, t > 0, \quad (2)$$

$$T_1 \quad t=0 = T_2 \quad t=0 = T_0, \quad (3)$$

$$-\lambda_1(T_1) \cdot \frac{\partial T_1}{\partial r} \quad r=0 = (q_n)_{max}, \quad (4)$$

$$T_1 \quad r=R_6 = T_2 \quad r=R_6, \quad (5)$$

$$\lambda_1(T_1) \cdot \frac{\partial T_1}{\partial r} \quad r=R_6 = \lambda_2(T_2) \frac{\partial T_2}{\partial r} \quad r=R_6, \quad (6)$$

$$T_2 \rightarrow T_0, \left(\frac{\partial T_2}{\partial r}\right) \rightarrow 0 \text{ при } r \rightarrow +\infty. \quad (7)$$

$$T_1(r, t) = \left\{ T_0^{\nu+1} + \frac{4(\nu+1) \cdot (q_n)_{\max} \cdot a_1 \cdot \sqrt{t}}{\lambda_{01}} \cdot \left[\sum_{n=0}^{\infty} b^n \operatorname{ierfc} \left(\frac{2R_B n + r}{2a_1 \sqrt{t}} \right) - \sum_{n=0}^{\infty} b^n \cdot \operatorname{ierfc} \left(\frac{2R_B n - r}{2a_1 \sqrt{t}} \right) \right] \right\}^{\frac{1}{\nu+1}}, \quad (8)$$

$$T_2(r, t) = \sum_{n=0}^{\infty} b^n \cdot \operatorname{ierfc} \left(\frac{R_B n}{a_1 \sqrt{t}} + \frac{r}{2a_2 \sqrt{t}} \right)^{\frac{1}{\nu+1}}. \quad (9)$$

Для проведення розрахунків за формулами (1) – (9) було використано стандартне програмне забезпечення у вигляді пакетів прикладних програм за сучасними чисельними методами. Результати розрахунків для різних швидкостей обдуву потоком повітря, режимів обтікання та матеріалів оболонки представлено на рис. 2 – 5.

З результатів розрахунків, представлених на рис. 2 – 5, випливає, що температура у зонах максимальних термічних впливів істотно залежить від швидкості обдуву потоком повітря та режиму обтікання: наприклад, для часів зовнішньої термічної дії $t = 9 \dots 22$ с при збільшенні швидкості обдуву від $M = 1,5$ до $M = 3,0$ значення температури на поверхні оболонки зростають у 2,7...3,5 рази для ламінарного режиму обтікання та у 4,1...5,3 рази – для турбулентного режиму обтікання; при цьому для внутрішнього боку оболонки вказані зростання температури знижуються відповідно для ламінарного режиму обтікання до 1,7...2,3 рази, а для турбулентного режиму обтікання – до 2,5...3,1 рази. Крім цього, збільшення часу зовнішньої термічної дії призводить у всіх випадках тільки до зростання температури у будь-якій точці по товщині оболонки. Заміна матеріалу оболонки на більш теплопровідний (наприклад, заміна сталеві оболонки на мідну (табл. 2)) призводить до зростання її температури у 1,4...2,5 рази для усіх досліджуваних швидкостей обдуву потоком повітря та режимів обтікання.

Таблиця 2. Теплофізичні характеристики матеріалу оболонок ($T_0 = 293$ К, $P = 10^5$ Па) [1,2]

Характеристика Матеріал	ρ , кг/м ³	λ , Вт/м·К	C , кДж/кг·К	C_V , Дж/м ³ ·К
Сталь	7830	53,6	0,405	$3,64 \cdot 10^6$
Латунь	8400	111	0,385	$3,23 \cdot 10^6$
Мідь	8900	390	0,388	$3,45 \cdot 10^6$
Алюміній	2650	209	0,896	$2,37 \cdot 10^6$

Примітка. ρ , λ , C , C_V – густина, коефіцієнт теплопровідності, питома та об'ємна теплоємність матеріалу оболонки відповідно.

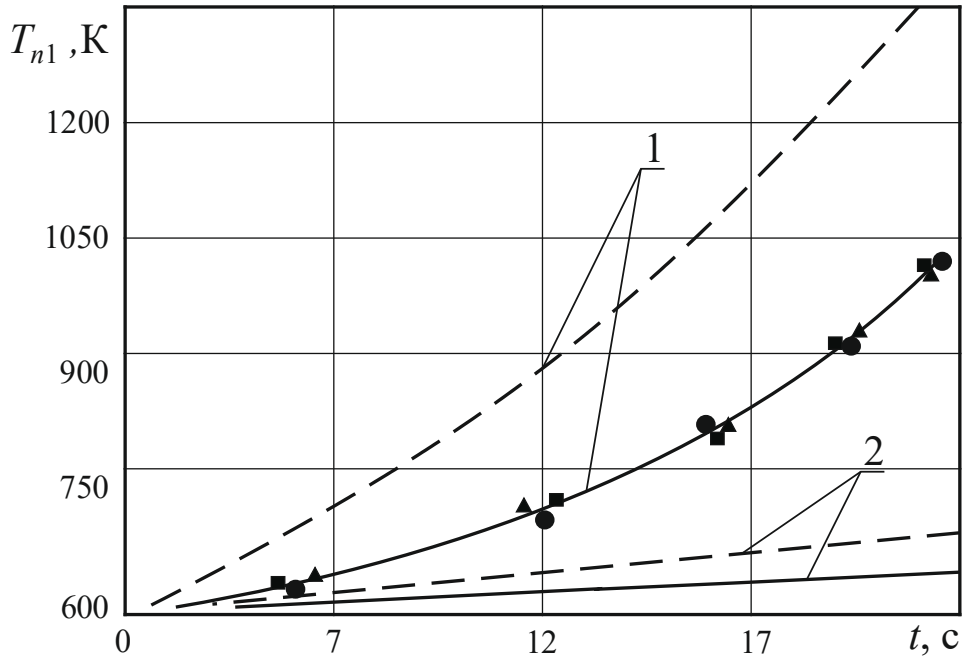


Рисунок 2. Залежність температури зовнішньої поверхні оболонки заряду суміші на основі $Mg + NaNO_3$ від часу теплової дії зовнішнього надзвукового потоку повітря ($T_{n1}=T_1|_{r=0}$; $T_0 = 300$ К; $R_3 - R_6 = 2 \cdot 10^{-3}$ м; оболонка металева (сталь 12X18H10T [1])): 1 – $M = 3$; 2 – $M = 1,5$; ———— – ламінарний режим обтікання; - - - - - – турбулентний режим обтікання; ■, ●, ▲ – експериментальні дані (ламінарний режим обтікання, передня критична точка ($x = 0$))

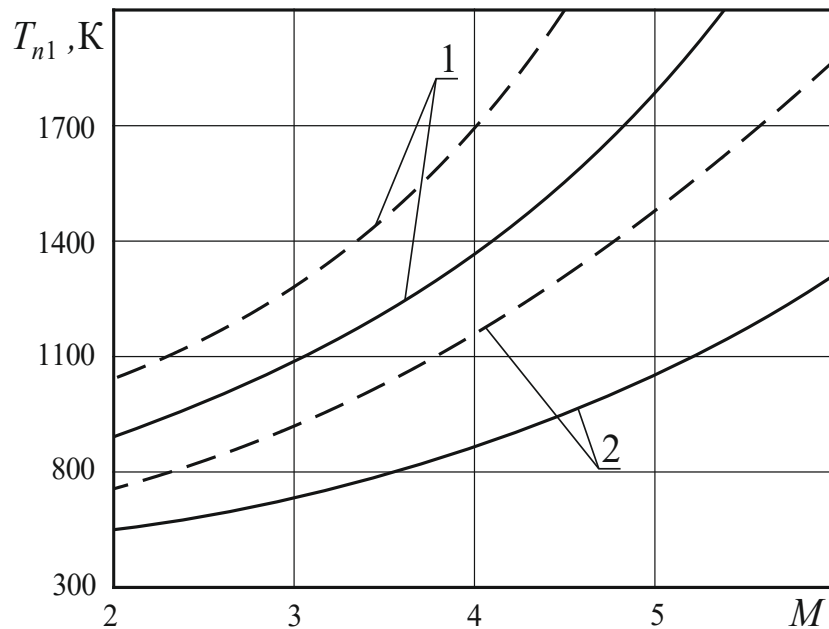


Рисунок 3. Залежність температури зовнішньої поверхні оболонки заряду суміші на основі $Al + NaNO_3$ від швидкості надзвукового потоку повітря ($T_0 = 300$ К; $R_3 - R_6 = 2 \cdot 10^{-3}$ м; $t = 7$ с): 1 – оболонка мідна; 2 – оболонка сталевая (сталь 12X18H10T [1]); ———— – ламінарний режим обтікання; - - - - - – турбулентний режим обтікання

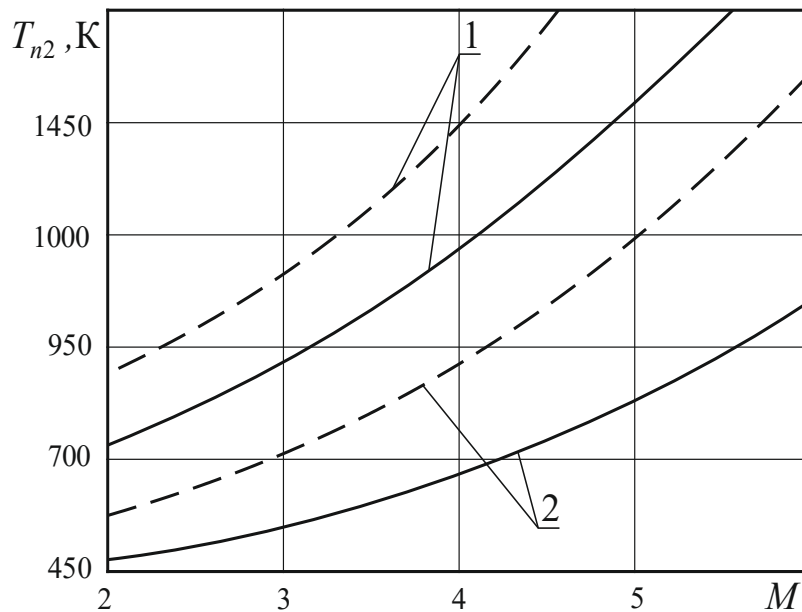


Рисунок 4. Залежність температури внутрішньої поверхні оболонки заряду суміші на основі $Mg + NaNO_3$ від швидкості надзвукового потоку повітря ($T_{n2}=T_2|_{r=R_B}$; $T_0 = 300$ К; $R_3 - R_6 = 2 \cdot 10^{-3}$ м; $t = 7$ с): 1 – оболонка мідна; 2 – оболонка сталева (сталевий 12Х18Н10Т); ———— – ламінарний режим обтікання; - - - - - – турбулентний режим обтікання

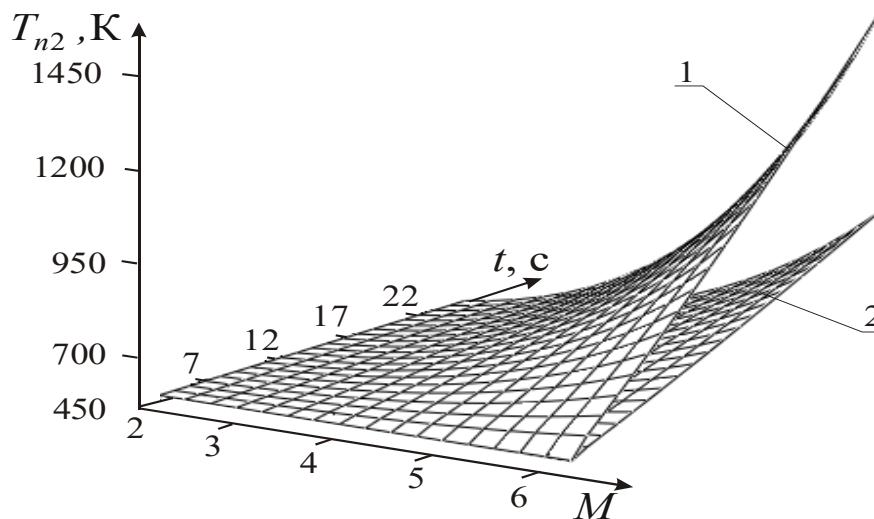


Рисунок 5. Тривимірне зображення залежностей температури внутрішньої поверхні оболонки заряду суміші на основі $Al + NaNO_3$ від швидкості надзвукового обдуву потоком повітря та часу його дії ($T_0 = 300$ К; $R_3 - R_6 = 2 \cdot 10^{-3}$ м; оболонка металева (сталевий 12Х18Н10Т)): 1 – турбулентний режим обтікання; 2 – ламінарний режим обтікання

Таким чином, температура у зонах максимальних зовнішніх термічних дій надзвукового потоку повітря на поверхні оболонки (аналогічно й для її внутрішнього

боку) у випадку турбулентного режиму обтікання значно переважає її значення для випадку ламінарного режиму обтікання (наприклад, для $M = 2,5 \dots 6,0$ – у $1,7 \dots 2,97$ разу) незалежно від теплопровідності матеріалу оболонки.

В якості пожежонебезпечних термодій на поверхню циліндричних металевих оболонок з зарядами сумішей при їх застосуванні (умови пострілу та польоту) приймаються дії, що мають критичні значення швидкостей надзвукового обдуву потоком повітря (M_j^* , $j = 1, 2, \dots$) та часів його теплового впливу (τ_j^* , $j = 1, 2, \dots$), значення критерію Рейнольдса (Re^* , при $Re > Re^*$ – режим обтікання турбулентний, а при $Re < Re^*$ – ламінарний), при яких температури внутрішніх поверхонь оболонок, що контактують з зарядами сумішей, задовольняють наступні умов:

$$T_{n2} > T_3^{(i)}, i = 1, 2, \dots, \quad (10)$$

де T_{n2} – температура внутрішньої поверхні оболонки; $T_3^{(i)}$ – температура, при якій починається саморозігрів заряду i -ої суміші в результаті процесу екзотермічного окиснення металевого пального в газоподібних продуктах термічного розкладання окиснювача та добавок органічних та неорганічних речовин (так звана температура займання частинок металів в активних газоподібних продуктах розкладання сумішей, яка залежить як від технологічних параметрів сумішей (співвідношення компонентів та їх дисперсності), так і від зовнішніх чинників (температури, тиску)).

Виконання умов (10) призводить до швидкого займання заряду суміші (в межах $10^{-3} \dots 10^{-2}$ с) з подальшим прискоренням процесу його горіння в замкненому об'ємі, в якому відбувається різке підвищення температури нагріву та тиску навколишнього середовища, що призводить до передчасного спрацьовування виробів та пожежонебезпечного руйнування окремих частин їх корпусів та викиду в навколишнє середовище високотемпературних (до $3000 \dots 4000$ К [1, 2]) продуктів згорання сумішей, а також нагрітих залишків корпусів та частин зарядів, що не згоріли, які здатні займатися та руйнувати навколишні об'єкти.

Експериментально було встановлено наступні діапазони зміни температури займання T_3 частинок Mg та Al у активних газоподібних продуктах розкладання нітратовмісних окиснювачів та добавок, що розглядались, (основний продукт – O_2 (до $50 \dots 60$ %), інші – N_2 (до $20 \dots 30$ %), CO та CO_2 (не більше $5 \dots 7$ %) та ін.), які характерні для подальшого розвитку стійкого, не вибухонебезпечного розвитку їх горіння:

для сумішей на основі $Mg + NaNO_3$:

$$T_3 = 1250 \dots 1530 \text{ К} (56 \text{ мкм} \leq d_m \leq 305 \text{ мкм});$$

для сумішей на основі $Al + NaNO_3$:

$$T_3 = 1370 \dots 1670 \text{ К} (54 \text{ мкм} \leq d_m \leq 310 \text{ мкм}). \quad (11)$$

Порівнюючи отримані вище діапазони температури T_{n2} з діапазонами зміни температур $T_3^{(i)}$, можна встановити конкретні значення параметрів M_j^* ($j = 1, 2, \dots$) та τ_j^* ($j = 1, 2, \dots$), починаючи з яких температура T_{n2} починає перевищувати $T_3^{(i)}$, звідки випливає, що пожежонебезпечні термодії на поверхню заряду сумішей є основною причиною прискорення процесу його горіння, передчасного спрацьовування виробу та його вибухонебезпечного руйнування (табл. 3).

Таблиця 3. Діапазони зміни критичних значень швидкостей надзвукового обдуву потоком повітря M_j^* ($j = 1, 2, \dots$) та часів дії τ_j^* ($j = 1, 2, \dots$) на циліндричну оболонку з різних матеріалів

Суміш	Параметр	M_j^*	τ_j^* , с
Суміш на основі Mg + NaNO ₃ (оболонка мідна)	5,9		$\tau_1^* > 6,9$ при $T_{n2} > (T_3^{Mg})_{\min} = 1250$ К
			$\tau_2^* > 8,2$ при $T_{n2} > (T_3^{Mg})_{\max} = 1530$ К
	2,5		$\tau_3^* > 13,7$ при $T_{n2} > (T_3^{Mg})_{\min} = 1250$ К
			$\tau_4^* > 15,9$ при $T_{n2} > (T_3^{Mg})_{\max} = 1530$ К
Суміш на основі Mg + NaNO ₃ (оболонка сталева)	5,9		$\tau_5^* > 11,5$ при $T_{n2} > (T_3^{Mg})_{\min} = 1250$ К
			$\tau_6^* > 14,2$ при $T_{n2} > (T_3^{Mg})_{\max} = 1530$ К
	2,5		$\tau_7^* > 19,1$ при $T_{n2} > (T_3^{Mg})_{\min} = 1250$ К
			$\tau_8^* > 23,2$ при $T_{n2} > (T_3^{Mg})_{\max} = 1530$ К
Суміш на основі Al + NaNO ₃ (оболонка мідна)	5,9		$\tau_9^* > 5,7$ при $T_{n2} > (T_3^{Al})_{\min} = 1370$ К
			$\tau_{10}^* > 6,9$ при $T_{n2} > (T_3^{Al})_{\max} = 1670$ К
	2,5		$\tau_{11}^* > 14,8$ при $T_{n2} > (T_3^{Al})_{\min} = 1370$ К
			$\tau_{12}^* > 16,7$ при $T_{n2} > (T_3^{Al})_{\max} = 1670$ К
Суміш на основі Al + NaNO ₃ (оболонка сталева)	5,9		$\tau_{13}^* > 11,9$ при $T_{n2} > (T_3^{Al})_{\min} = 1370$ К
			$\tau_{14}^* > 13,4$ при $T_{n2} > (T_3^{Al})_{\max} = 1670$ К
	2,5		$\tau_{15}^* > 21,6$ при $T_{n2} > (T_3^{Al})_{\min} = 1370$ К
			$\tau_{16}^* > 23,2$ при $T_{n2} > (T_3^{Al})_{\max} = 1670$ К

Висновки:

1. В результаті аналізу передчасного спрацьовування виробів на основі піротехнічних нітратно-металічних сумішей з добавками органічних та неорганічних речовин в умовах зовнішніх термодій, яким піддаються поверхні їх металевих корпусів при різних екстремальних ситуаціях (наприклад, в умовах ударного нагріву корпусів виробів при їх пострілі та польоті), встановлено, що основною причиною пожежовибухонебезпечного спрацьовування виробів є те, що значні температури нагріву їх металевих корпусів можуть істотно перевищувати температури спалахування розглядуваних частинок металевого пального (магнію та алюмінію) у активних газоподібних продуктах термічного розкладання окиснювача (нітрату натрію), добавок органічних (парафіну, стеарину, нафталіну, антрацену, уротропіну, метальдегиду, каніфолі, ідитолу) та неорганічних речовин (фторидів металів (LiF, NaF, NiF₂, BaF₂, SiF₂, SrF₂, AlF₃)), що є основними компонентами зарядів піротехнічних сумішей. Це призводить до розвитку процесу горіння заряду піротехнічної суміші під металевим корпусом виробу, що веде до прискорення його процесу горіння, переходу його у режим вибухонебезпечного протікання, передчасного спрацьовування виробу та руйнування металевих корпусів, викиду у навколишнє середовище їх високотемпературних залишків, частин суміші, що не згоріли, дисперсних потоків, що іскряться, тощо, які є пожежонебезпечними для навколишніх об'єктів та можуть призводити до ураження людей.

2. В результаті проведених досліджень зовнішніх ударних термовпливів надзвукового потоку повітря на поверхню металевих оболонок зарядів сумішей встановлено наступні нові закономірності для циліндричної металевої оболонки:

– для ламінарного режиму обтікання максимум зовнішнього теплового потоку знаходиться поблизу її передньої критичної точки ($x=0$, $M = 0$), а для турбулентного режиму обтікання – цей максимум зміщується від $x = 0$ до $x_{max} = (0,53...0,65)L$;

– при збільшенні швидкості потоку повітря від $M = 1,5$ до $M = 3,0$ та часу його впливу до 22 с значення максимальної температури зовнішньої поверхні оболонки збільшуються у 2,7...3,5 рази для ламінарного режиму обтікання та у 4,1...5,3 рази – для турбулентного режиму обтікання; заміна матеріалу оболонки на більш теплопровідну (сталеву оболонку на мідну) призводить до зростання її температури у 1,4...2,5 рази.

Отримані результати є корисними на стадії розробки та проектування піротехнічних виробів на їх основі, що дозволяє передбачати можливі пожежонебезпечні ситуації при передчасному спрацьовуванні виробів в умовах їх застосування.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Кириченко О. В. Основи пожежної безпеки піротехнічних нітратовмісних виробів в умовах зовнішніх термовпливів. Монографія / О. В. Кириченко, П. С. Пашковський, В. А. Ващенко, Ю. Г. Лега. – К.: Наукова думка, 2012. – 318 с.
2. Ващенко В. А. Процессы горения металлизированных конденсированных систем / В. А. Ващенко, О. В. Кириченко, Ю. Г. Лега, П. И. Заика, И. В. Яценко, В. В. Цыбулин. – К.: Наукова думка, 2008 – 745 с.
3. Conkling J. A. Chemistry of Pyrotechnics: Basic Principles and Theory. New York, 1985.
4. Ledgard J. B. The Preparatory Manual of Black Powder and Pyrotechnics. Washington, 2006.
5. Russell M. S. The Chemistry of Fireworks. Royal Society of Chemistry Paperbacks, 2003.
6. О. В. Kyrychenko, О. S. Dibrova, R. B. Motrychuk, О. С. Baanovsyy, V. V. Tsybulin, “Determination of the content of high-temperature condensate in the combustion products of pyrotechnic nitrate-metal mixtures at elevated external pressures”, *Nauka ta vyrobnytstvo: mizhvuzivskyi tematychny zbirnyk naukovykh prats*, issue. 19, pp. 323-332, 2018.
7. Фатеев В. М. Піротехніка / В. М. Фатеев, Ю. П. Приходько, Л. І. Таборов, // К.: Наукова думка, 2017.
8. V. V. Kovalyshyn, V. M. Marych, Y. M. Novitskyi, B. M. Gusar, V. V. Chemetskiy, O. L. Mirus “Improvement of a discharge nozzle damping attachment to suppress fires of class D”, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, No. 5 (95), pp. 68-76, 2018.
9. О. Dibrova, О. Kyrychenko, R. Motrychuk, М. Tomenko, V. Melnyk, “Fire safety improvement of pyrotechnic nitrate-metal mixtures under external thermal conditions”, *Technology audit and production reserves*, No. 1/1(51), pp. 44-49, 2020.
10. Кириченко О. В. Вплив підвищених зовнішніх тисків на температуру і склад продуктів згорання піротехнічних нітратно-алюмінієвих сумішей при різних співвідношеннях компонентів / О. В. Кириченко, В. А. Ващенко, П. І. Заїка, В. В. Цыбулін, Т. І. Владінова, В. М. Тупицький // Науковий вісник УкрНДІПБ, 2010. – № 2(22). – с. 87 – 94.
11. Діброва О. С. Підвищення пожежної безпеки піротехнічних нітратно-металевих сумішей в умовах зовнішніх термічних дій / О. С. Діброва, О. В. Кириченко, Р. Б. Мотрічук, В. А. Ващенко // *International Scientific Journal “Intenauka”* <http://www.inter-nauka.com>, 2020. – № 5/5799.
12. Діброва О. С. Закономірності впливу технологічних параметрів на пожежну безпеку піротехнічних нітратно-титанових сумішей в умовах зовнішніх термічних дій /

О. С. Діброва, О. В. Кириченко, Р. Б. Мотрічук, В. А. Ващенко // International Scientific Journal «Intenauka» <http://www.inter-nauka.com>, 2020. – № 5/5798.

13. Кириченко Є. П. Дослідження процесів зовнішніх термоударних дій на піротехнічні металооксидні вироби в умовах пострілу та польоту / Є. П. Кириченко // Пожежна безпека: теорія і практика. Збірник наукових праць ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля, 2021. – Т. 5. – № 2. – С. 87 – 102.

14. Кириченко О. В. Визначення вмісту високотемпературного конденсату в продуктах згоряння піротехнічних нітратно-металевих сумішей при підвищених зовнішніх тисках / О. В. Кириченко, О. С. Діброва, Р. Б. Мотрічук, О. С. Барановський, В. В. Цибулін // Наука та виробництво: міжвузівський тематичний збірник наукових праць, 2018. – Вип. 19. – с. 323 – 332.

15. Кириченко О. В. Дослідження спалахування та горіння частинок алюмінієвомагнієвих сплавів у продуктах розкладання твердих піротехнічних палив / О. В. Кириченко, О. С. Діброва, Р. Б. Мотрічук, В. А. Ващенко, С. О. Колінько // Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека, 2019. – № 2 (8) (ISSN 2518-1777). №2 (8). – с. 81 – 85.

16. Кириченко О. В. Дослідження спалахування та горіння частинок металевого пального у продуктах розкладання нітратовмісних окиснювачів та органічних речовин при зовнішніх термічних впливах / О. В. Кириченко, Р. Б. Мотрічук, О. С. Діброва, В. П. Мельник, В. А. Ващенко, Т. І. Бутенко // Сборник научных трудов: Проблемы пожарной безопасности, 2020. – № 47. – с. 50 – 59.

17. Кириченко Є. Закономірності впливу технологічних параметрів та зовнішніх чинків на температуру займання та час згоряння частинок магнію та алюмінію в продуктах розкладання оксидів металів / Є. Кириченко, В. Гвоздь, В. Ващенко, О. Кириченко, О. Дядюшенко, В. Мельник // Цивільний захист та пожежна безпека, 2021. – № 2(12). – С. 111 – 121.

REFERENCE

1. Kyrychenko O. V. Osnovy pozhezhnoi bezpeky pirotekhnichnykh nitratovmisnykh vyrobiv v umovakh zovnishnykh termovplyviv. Monohrafiia / O. V. Kyrychenko, P. S. Pashkovskiy, V. A. Vashchenko, Yu. H. Leha. – K.: Naukova dumka, 2012. – 318 s.

2. Vashchenko V. A. Protsessy horenyia metallyzovannykh kondensirovannykh system / V. A. Vashchenko, O. V. Kyrychenko, Yu. H. Leha, P. Y. Zayka, Y. V. Yatsenko, V. V. Tsybulyn. – K.: Naukova dumka, 2008 – 745 s.

3. Conkling J. A. Chemistry of Pyrotechnics: Basic Principles and Theory. New York, 1985.

4. Ledgard J. B. The Preparatory Manual of Black Powder and Pyrotechnics. Washington, 2006.

5. Russell M. S. The Chemistry of Fireworks. Royal Society of Chemistry Paperbacks, 2003.

6. O. V. Kyrychenko, O. S. Dibrova, R. B. Motrychuk, O. S. Baanovsyy, V. V. Tsybulin, “Determination of the content of high-temperature condensate in the combustion products of pyrotechnic nitrate-metal mixtures at elevated external pressures”, Nauka ta vyrobnytstvo: mizhvuzivskyu tematychnyy zbirnyk naukovykh prats, issue. 19, pp. 323-332, 2018.

7. Fatiev V. M. Pirotekhnika / V. M. Fatiev, Yu. P. Prykhodko, L. I. Taborov, // K.: Naukova dumka, 2017.

8. V. V. Kovalyshyn, V. M. Marych, Y. M. Novitskiy, V. M. Gusar, V. V. Chemetskiy, O. L. Mirus “Improvement of a discharge nozzle damping attachment to

suppress fires of class D”, Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, No. 5 (95), pp. 68-76, 2018.

9. O. Dibrova, O. Kyrychenko, R. Motrychuk, M. Tomenko, V. Melnyk, “Fire safety improvement of pyrotechnic nitrate-metal mixtures under external thermal conditions”, Technology audit and production reserves, No. 1/1(51), pp. 44-49, 2020.

10. Kyrychenko O. V. Vplyv pidvyshchenykh zovnishnykh tyskiv na temperaturu i sklad produktiv zghorannia pirotekhnichnykh nitratno-aliuminiievyykh sumishei pry riznykh spivvidnoshenniakh komponentiv / O. V. Kyrychenko, V. A. Vashchenko, P. I. Zaika, V. V. Tsybulin, T. I. Vladinova, V. M. Tupytskyi // Naukovyi visnyk UkrNDIPB, 2010. – № 2(22). – с. 87 – 94.

11. Dibrova O. S. Pidvyshchennia pozhezhnoi bezpeky pirotekhnichnykh nitratno-metalevykh sumishei v umovakh zovnishnykh termichnykh dii / O. S. Dibrova, O. B. Kyrychenko, R. B. Motrichuk, V. A. Vashchenko // International Scientific Journal “Intenauka” <http://www.inter-nauka.com>, 2020. – № 5/5799.

12. Dibrova O. S. Zakonomirnosti vplyvu tekhnolohichnykh parametriv na pozhezhnu bezpeku pirotekhnichnykh nitratno-tytanovykh sumishei v umovakh zovnishnykh termichnykh dii / O. S. Dibrova, O. V. Kyrychenko, R. B. Motrichuk, V. A. Vashchenko // International Scientific Journal «Intenauka» <http://www.inter-nauka.com>, 2020. – № 5/5798.

13. Kyrychenko Ye. P. Doslidzhennia protsesiv zovnishnykh termoudarnykh dii na pirotekhnichni metalooksydni vyroby v umovakh postrilu ta polotu / Ye. P. Kyrychenko // Pozhezhna bezpeka: teoriia i praktyka. Zbirnyk naukovykh prats ChIPB im. Heroiv Chornobylia, 2021. – T. 5. – № 2. – S. 87 – 102.

14. Kyrychenko O. V. Vyznachennia vmistu vysokotemperaturnoho kondensatu v produktakh zghoriannia pirotekhnichnykh nitratno-metalevykh sumishei pry pidvyshchenykh zovnishnykh tyskakh / O. V. Kyrychenko, O. S. Dibrova, R. B. Motrichuk, O. S. Baranovskyi, V. V. Tsybulin // Nauka ta vyrobnytstvo: mizhvuzivskyi tematychnyi zbirnyk naukovykh prats, 2018. – Vyp. 19. – s. 323 – 332.

15. Kyrychenko O. V. Doslidzhennia spalakhuvannia ta horinnia chastynok aliuminiievomahnievykh splaviv u produktakh rozkladannia tverdykh pirotekhnichnykh palyv / O. V. Kyrychenko, O. S. Dibrova, R. B. Motrichuk, V. A. Vashchenko, S. O. Kolinko // Naukovyi visnyk: Tsyvilnyi zakhyst ta pozhezhna bezpeka, 2019. – № 2 (8) (ISSN 2518-1777). №2 (8). – s. 81 – 85.

16. Kyrychenko O. V. Doslidzhennia spalakhuvannia ta horinnia chastynok metalevoho palnogo u produktakh rozkladannia nitratovmisnykh oksyeniuvachiv ta orhanichnykh rehovyn pry zovnishnykh termichnykh vplyvakh / O. V. Kyrychenko, R. B. Motrichuk, O. S. Dibrova,, V. P. Melnyk, V. A. Vashchenko, T. I. Butenko // Sbornyk nauchnykh trudov: Problemy pozharnoi bezopasnosti, 2020. – № 47.– s. 50 – 59.

17. Kyrychenko Ye. Zakonomirnosti vplyvu tekhnolohichnykh parametriv ta zovnishnykh chynkiv na temperaturu zaimannia ta chas zghoriannia chastynok mahniuu ta aliuminiuu v produktakh rozkladannia oksydiv metaliv / Ye. Kyrychenko, V. Hvozd, V. Vashchenko, O. Kyrychenko, O. Diadiushenko, V. Melnyk // Tsyvilnyi zakhyst ta pozhezhna bezpeka, 2021. – № 2(12). – S. 111 – 121.

UDC 614.841

*Nazarii KOZIAR, PhD in technical sciences (ORCID: 0000-0001-9082-0771),
National University of Civil Protection of Ukraine*

**DETERMINATION OF THE CRITICAL VALUES OF THE PARAMETERS
OF THE EXTERNAL THERMOSHOCK EFFECTS OF A SUPERSONIC AIR FLOW
ON THE SURFACE OF CYLINDRICAL METAL SHELLS OF CHARGES
OF PYROTECHNIC NITRATE AND METAL MIXTURES UNDER
THE CONDITIONS OF THEIR APPLICATION**

Mathematical models of external thermal shock effects of supersonic air flow on metal shells of charges of nitrate-metallized mixtures with additives of organic and inorganic substances were developed, taking into account the cylindrical shape of the shells; technological parameters of mixtures and their thermomechanical properties; temperature dependences of the thermophysical properties of the mixture and shell; distribution of the external heat flow along the shell surface depending on the flow mode (laminar, turbulent). The critical values of the parameters of external thermal shock effects have been determined, the excess of which leads to premature ignition of mixture charges, explosive development of their combustion under the shells and, ultimately, to the fire-hazardous destruction of pyrotechnic products.

Key words: *pyrotechnic products, fire safety, gas dynamic processes, methods of thermal conductivity theory, pyrotechnic nitrate-metallized mixtures.*